

Japanese Unexamined Publication No. 58-70652

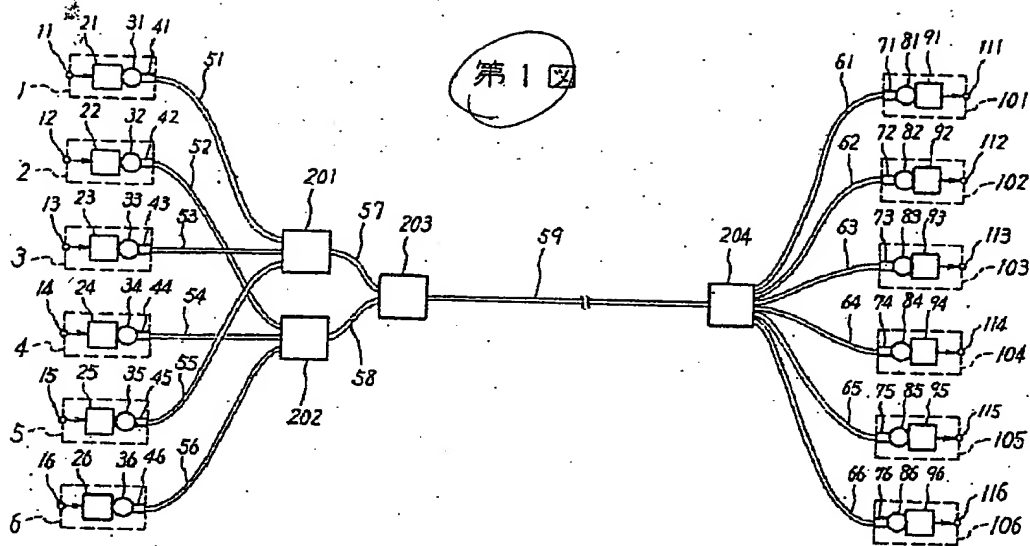
(Published on April 27, 1983)

#### Abstract

(line 12, upper left column to line 14 upper right column of page 323)

The first, third and fifth optical fibers 51, 53 and 55 among the first to sixth optical fibers are connected to the first optical multiplexing circuit 201 having the wavelength dependency of interference type. The linearly polarized lights having the polarization surface parallel with the paper surface of Fig. 1. of the output lights from the first, third and fifth semiconductor lasers 31, 33 and 35 are wavelength multiplexed, to be introduced into the seventh optical fiber 57. Similarly, the second, fourth and sixth optical fibers 52, 54 and 56 are connected to the second optical multiplexing circuit 202 having the wavelength dependency of interference film type, the linearly polarized lights perpendicular to the paper surface of Fig. 1. of the output lights from the second, fourth and sixth semiconductor lasers 32, 34 and 36 are wavelength multiplexed, to be introduced into the eighth optical fiber 58. Each of the seventh and the eighth optical fibers has the same characteristic as each of the first to sixth optical fibers.

The seventh and the eighth optical fibers 57 and 58 are connected to the third optical multiplexing circuit 203 without the wavelength dependency having polarization surface optical multiplexing circuit configuration. The two linearly polarized lights crossing to each other with the polarized surface thereof are multiplexed, to be introduced into the transmission path optical fiber 59. The transmission path optical fiber 59 consists of convergence type multimode optical fiber, which has core diameter of  $50\ \mu\text{m}$ , fiber outer diameter of  $125\ \mu\text{m}$  and the numerical aperture (N. A.) of 0.2.



2

⑬ 日本国特許庁 (JP)

⑪ 特許出願公開

⑫ 公開特許公報 (A)

昭58—70652

⑤ Int. Cl.<sup>3</sup>  
H 04 B 9/00

識別記号

庁内整理番号  
6442—5K

⑬ 公開 昭和58年(1983)4月27日

発明の数 1  
審査請求 未請求

(全 5 頁)

⑭ 波長多重光ファイバ伝送システム

東京都港区芝五丁目33番1号日  
本電気株式会社内

① 特 願 昭56—168545  
② 出 願 昭56(1981)10月23日  
⑦ 発 明 者 峰村孝一

① 出 願 人 日本電気株式会社  
東京都港区芝5丁目33番1号  
⑦ 代 理 人 弁理士 芦田坦 外2名

明 細 書

1. 発明の名称

波長多重光ファイバ伝送システム

2. 特許請求の範囲

1. 互いに発振波長の異なる少なくとも3個の半導体レーザ、これら半導体レーザの出力光の波長多重を行う光合波回路、波長多重された光を伝搬する伝送路光ファイバ、伝播された光を波長毎に分波する分波回路、および分波した各波長の光を検出する光検出器を含む光ファイバ伝送システムにおいて、前記光合波回路が波長依存性のある光多重回路と波長依存性のない光多重回路の組合せで構成されていることを特徴とする波長多重光ファイバシステム。

3. 発明の詳細な説明

この発明は波長多重光ファイバ伝送システム、特に光源が半導体レーザで多重されるチャンネル数が3以上の場合に適する波長多重光ファイバ伝送システムに関するものである。

光の波長が異なることを利用して複数の光を多

重し、一本の光ファイバで伝送する波長多重光ファイバ伝送技術は、伝送路光ファイバの経済的利用が可能なること、既存電気回路の壁を破るような大容量伝送が可能なること、たとえばチャンネルの増設が伝送路光ファイバに関係なく光送受信機や光合波分波回路の変更だけで出来るといったようにシステムの柔軟性が高いこと、又アナログ信号とデジタル信号等の異種信号の多重伝送が可能なること等の種々の長所を有しており、近距離低速伝送系から長距離高速伝送系にいたる種々の伝送系を対象として最近活発に研究開発されている。

光合波回路(光多重回路とも言われる)や光分波回路としては誘電体多層膜(干渉膜)の光反射透過特性が波長依存性を有することを利用した干渉膜型や、回折格子で回折される光の角度が波長依存性を有することを利用した回折格子型の回路が一般に用いられることが多い。

ところで干渉膜型では、干渉膜のきれがよくないために波長間隔が狭くてできないという欠点と、チャンネル数が多い場合には干渉膜型回路を多数

にしなければならないために挿入損失が大きく且つ構造が複雑になるという欠点とがあり、したがってチャンネル数の実用的な上限は4程度である。

一方回折格子型では、チャンネル数を多くすることは干渉膜型よりは容易であるが、光が出射される側の光ファイバのコア径を光が入射される側の光ファイバのコア径よりも十分に大きくしないと、光源の波長変化が生じた場合回折された光が出射側の光ファイバに入力しなくなり、わずかの波長変化で挿入損失が大きく増加する等の欠点がある。ところが回折格子型の光合波回路では、出射側の光ファイバとなる伝送路光ファイバのコア径等は、周波数帯域等の観点からシステム設計で一般的に定まることが多いために、上記の欠点をこの光合波回路で回避しようとして入射側の光ファイバのコア径を十分小さくすると、この回路の外においてこの光ファイバと光源の間の結合効率が悪くなるという欠点が生じる。特に伝送路光ファイバが単一モード光ファイバの場合には、一般にコア径が10  $\mu\text{m}$  以下なので、回折格子型の光合波

た。

なお光合波回路に回折格子型を使うことができないのにはもう1つの理由がある。即ちこの場合には、光源の波長の温度変化により光合波回路の挿入損失が大きくなるという欠点があった。そのために、ある使用温度範囲を考えると、システムの許容伝送路損失が低くできない、伝送路距離が長く出来ないという欠点があるからである。特に、伝送路光ファイバが単一モード光ファイバの場合には、この欠点は大きく、回折格子型の光合波回路を使うシステムは不可能であった。

したがって本発明の目的は、チャンネル数が3以上の場合に、従来よりも伝送路距離が長く出来る波長多重光ファイバ伝送システムを提供することにある。

この発明によれば、互いに発振波長の異なる少なくとも3個の半導体レーザ、これら半導体レーザの出力光の波長多重を行う光合波回路、波長多重された光を伝搬する伝送路光ファイバ、伝播された光を波長毎に分波する分波回路、および分波

回路は実現困難な状況にある。なお回折格子型の光分波回路では、出射側の光ファイバから出力される光は一般に伝送路光ファイバのコア径よりも大きい受光径を持つ光検出器に導かれるので、出射側の光ファイバのコア径を大きくすることは容易で、10チャンネル以上のものが開発されている。

以上のような観点から、チャンネル数が4以下の波長多重光ファイバ伝送システムでは、一般に光合波回路には干渉膜型が、光分波回路には干渉膜型または回折格子型が使用されてきている。そしてチャンネル数が5以上のシステムでは、光合波回路としては回折型は全く使用できず、干渉膜型も回路の挿入損失が大きいためシステムの許容伝送路損失が小さくなって伝送路距離が短くならざるを得ず、而もこのシステムではチャンネル間の波長間隔が狭く出来ないから広い波長範囲が必要であり、このために伝送路光ファイバの損失の大きい波長範囲も使わざるを得ないために、伝送路距離はさらに短くなるという欠点があっ

した各波長の光を検出する光検出器を含む光ファイバ伝送システムにおいて、前記光合波回路が波長依存性のある光多重回路と波長依存性のない光多重回路の組合せて構成されていることを特徴とする波長多重光ファイバシステムが得られる。

次に図面を参照して詳細に説明する。

第1図はこの発明の波長多重光ファイバ伝送システムの最も好ましい実施例の構成を示すブロック図である。第1～第6の光送信機1～6の第1～第6の信号入力端子11～16にそれぞれ入力された電気信号は、第1～第6の送信回路21～26でそれぞれ増幅等を受け、第1～第6の半導体レーザ31～36にそれぞれ印加されて光信号に変換される。ここに第1～第6の半導体レーザ31～36の出力光の波長は $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_6$ は850 nm, 860 nm, 870 nm, 880 nm, 890 nmにそれぞれ設定されている。これら第1～第6の半導体レーザ31～36は活性層がGaAsでこの活性層の両側に $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 層を備えたダブルヘテロ構造を有しており、主に活性層中に混入させる微量

なA<sub>2</sub>の量を制御することにより前記のような800 nm帯の所望の波長の光が出力するようにしてある。

上記のような第1～第6の半導体レーザ31～36の出力光は第1～第6の結合回路41～46によりそれぞれ集光されて第1～第6の光ファイバ51～56にそれぞれ結合される。これらの第1～第6の光ファイバ51～56はコア長軸の長さが10 μm、短軸の長さが7 μmの楕円形コアを有する偏波面保存光ファイバで、これら光ファイバに直線偏光が入力された場合には同じ偏波面の直線偏光を出力する特性を有している。

上記の第1～第6の光ファイバのうち、第1、第3、第5の光ファイバ51、53、55は干渉型の波長依存性を有する第1の光多重回路201に接続されており、第1、第3、第5の半導体レーザ31、33、35の出力光の第1図の紙面に平行な偏波面を有する直線偏光が波長多重されて第7の光ファイバ57に導かれ、同様に、第2、第4、第6の光ファイバ52、54、56は同じく干渉膜型の波長依存性を有する第2の光多重回

路202に接続されており、第2、第4、第6の半導体レーザ32、34、36の出力光の第1図の紙面に垂直な偏波面の直線偏光が波長多重されて第8の光ファイバ58に導かれる。ここに第7および第8の光ファイバはいずれも第1～第6の光ファイバと同じ特性を持たせてある。

第7、第8の光ファイバ57と58は、波長依存性がなく偏波面光多重回路構成を持つ第3の光多重回路203に接続されており、互に偏波面の直交する2つの直線偏光は多重されて伝送路光ファイバ59に導かれている。伝送路光ファイバ59はコア径が50 μm、ファイバ外径が125 μm、開口数(N.A.)が0.2の集束型マルチモード光ファイバで出来ている。

伝送路光ファイバ59を伝搬した光は光分岐回路204へ入力する。光分岐回路204は回折格子型の分岐回路であって、その入力側には伝送路光ファイバ59が接続され、また出力側にはコア径が100 μm、N.A.が0.25のステップ型マルチモード光ファイバである第9～第14の光ファイ

バ61～66が接続されていて、伝送路光ファイバ59の出力の $\lambda_1 \sim \lambda_6$ の波長の光を分岐して第1～第6の光受信機101～106にそれぞれ導いている。

第1～第6の光受信機101～106においては、第9～第14の光ファイバ61～66の出力光を第7～第12の結合回路71～76で第1～第6の光検出器81～86にそれぞれ入力させ、ここで電気信号に変換したのち、第1～第6の受信回路91～96で増幅等を行ない、第1～第6の電気信号出力端子111～116に送出している。第1～第6の光検出器81～86には受光径が300 μmφのSi-アバランシェフォトダイオードが用いられている。

以上の説明から分るように、この波長多重光ファイバ伝送システムにおける光合波回路を要約して説明すると、波長依存性のある光多重回路と、波長依存性のない光多重回路の組み合わせて構成されており、この場合第1の光多重回路では1つおきの波長の光を波長多重し、第2の光多重回路で

は残りの波長の光を波長多重したのち、これら第1、第2の光多重回路の出力光を波長依存性のない光多重回路で多重するようになっている。従って伝送される光の波長間隔は第1、第2の光多重回路各々で波長多重される光の波長間隔の $\frac{1}{2}$ に出来るから、第1、第2の光多重回路各々の使用波長範囲とはほぼ同等の使用波長範囲で第1、第2の光多重回路各々が多重可能なチャンネル数の2倍のチャンネル数を多重伝送することが出来る。一方これを別の言い方をすると、伝送するチャンネル数を一定とすれば、使用波長範囲は約 $\frac{1}{2}$ に低減出来るから、伝送路光ファイバの損失の小さい波長範囲を使うことが出来るので、伝送路距離が長く出来る。

次にシステムの性態を具体的に説明すると第1の光多重回路201、第2の光多重回路202、および第3の光多重回路203の挿入損失は各々約1 dB、光分岐回路204の挿入損失は約1.5 dBであったので、光合波分波回路系の挿入損失は合計で約3.5 dBであった。また、第1、第2の光多

重回路201, 202各々に必要とされる波長範囲は, これら光多重回路各々で多重されるチャンネルの波長間隔が20nmなので, 40nm ( $20\text{nm} \times 2$ ) に20nmの余裕を考慮して合計では各々60nmになる。なお, 伝送路光ファイバ59が使用される波長範囲は, 伝送される各チャンネルの波長間隔が10nmなので, 50nm ( $10\text{nm} \times 5$ ) に10nmの余裕を考慮して60nmになる。伝送路光ファイバ59の損失は波長が $\lambda_1 = 840\text{nm}$ のチャンネルに対して最も大きく, 約2.8 dB/kmであった。

一方, 第1～第3の光多重回路からなる光合波回路系を従来の技術の干渉膜型光多重回路だけで構成するとすれば, この干渉膜型光多重回路で多重されるチャンネルの波長間隔は20nmなので, この干渉膜型光多重回路に必要とされる波長範囲は120nmになる。また, 伝送路光ファイバ59が使用される波長範囲も干渉膜型光多重回路に必要な波長範囲に等しい120nmになる。

一般に広い波長範囲で干渉膜の損失を小さくすることはリップル等の影響で難しいために, 干

渉膜型光多重回路に必要な波長範囲が広いと挿入損失が大きくなる。例えばチャンネル数が6, 波長間隔が20nm, 波長範囲が120nmの場合の800nm帯干渉膜型光多重回路の挿入損失は約4dBの値になる。また, 伝送路光ファイバ59が使用される波長範囲が広いとその損失の大きい波長領域も使わなければならなくなり, 或るチャンネルに対しては伝送路光ファイバ59の損失が大きくなる。例えば, 第1～第6の半導体レーザの出力光の波長 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_6$ を790nm, 810nm, 830nm, 850nm, 870nm, 890nmにそれぞれ設定すると, 伝送路光ファイバの損失は $\lambda_1 = 790\text{nm}$ のチャンネルに対して最も大きくて約3.5 dB/kmになる。

以上述べたように, 本実施例の波長多重光ファイバ伝送システムでは, 光合波分波回路系の挿入損失が従来よりも約2dB小さく出来た。また, 伝送路光ファイバが使用される波長領域が50nm狭くなったので, 伝送路光ファイバの損失が最も大きいチャンネルでは, 伝送路光ファイバの損失が

約3.5 dB/km から約2.8 dB/km に低下した。これらのために, 例えばビットレートが100 Mb/s の場合には, 伝送路距離は従来約10kmであったのが, 本実施例の構成をとることにより約13kmと約3km長くすることが出来た。

なお, 以上の実施例では伝送路光ファイバ59にコア径が50 $\mu\text{m}$ , N.A. が0.2の集束型マルチモード光ファイバを使用した, コア径が約10 $\mu\text{m}$ の単一モード光ファイバ等他のパラメータの光ファイバでもよい。また, 第3の光多重回路203として偏波面光多重回路を使用した, 波長依存性のないものなら何でもよい。例えば昭和53年3月5日発行の昭和53年度電子通信学会総合全国大会講演論文集分冊4の第4-112頁, 第855番に鹿田他により提案された複レンズ型光多重回路のようなものであってもよい。そして, このように第3の光多重回路203が偏波面光多重回路でない場合には, 第1～第8の光ファイバ51～58には偏波面保存光ファイバを特に使用しなくてもよい。

また, 第1～第6の半導体レーザ31～36は800nm帯の光を出力するAlGaAs半導体レーザであるとしたが, 半導体レーザの材料はInGaAsPのような他の材料であってもよいし, また波長帯も1 $\mu\text{m}$ 帯のような他の波長帯であってもよい。

更に伝送チャンネル数は6チャンネルとしたが, 特に6チャンネルに限定されるものではなく, 3チャンネル以上であれば何チャンネルであってもよい。これと関連して第1～第6の半導体レーザ31～36の出力光の波長の波長間隔は10nmであるとしたが, この波長間隔はチャンネル数や使用温度範囲での半導体レーザの波長変化範囲等を考慮して適当に定められてよく, 特に上記の値に限定されるものではない。

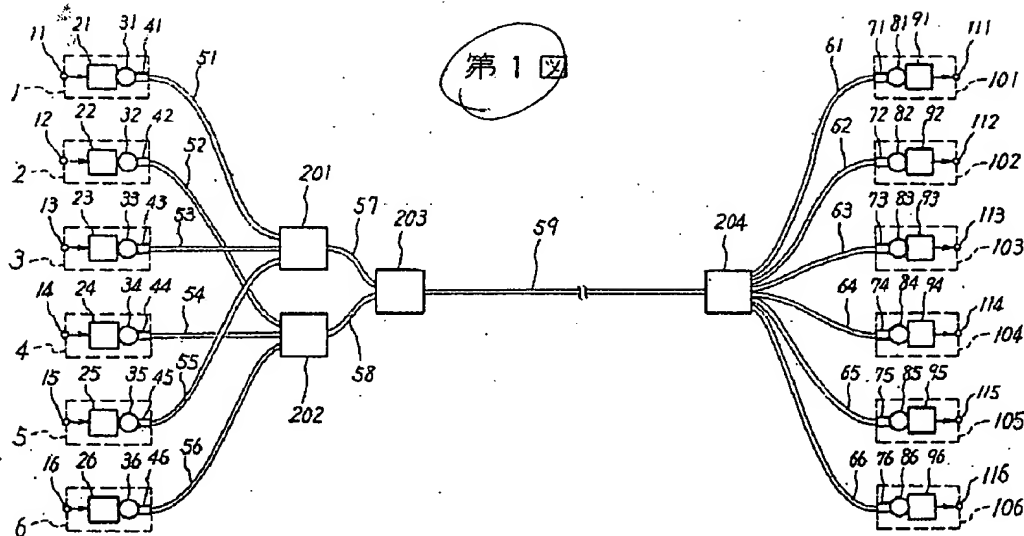
更にまた, 光合波回路は, 波長依存性のある2個の第1, 第2の光多重回路201, 202と波長依存性のない第3の光多重回路203の組み合わせで構成されたとしたが, 波長依存性のある光多重回路と波長依存性のない光多重回路との組み合わせはその他にも種々可能である。例えば, チャンネル

数が3の場合には、波長が $\lambda_1$ のチャンネル1の光と波長が $\lambda_3$ のチャンネル3の光とを波長依存性のある干渉膜型の光多重回路で波長多重したのち、この波長多重された光と波長が $\lambda_2$ (但し、 $\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3$ )のチャンネル2の光とを波長依存性のない光多重回路である偏波面光多重回路で多重してもよい。

#### 4. 図面の簡単な説明

第1図はこの発明による波長多重光ファイバ伝送システムの最も好ましい実施例の構成を示すブロック図である。

記号の説明：1～6は光送信機，11～16は電気信号入力端子，21～26は送信回路，31～36は半導体レーザ，41～46は結合回路，51～58は光ファイバ，59は伝送路光ファイバ，61～66は光ファイバ，71～76は結合回路，81～86は光検出器，91～96は受信回路，101～106は光受信機，111～116は電気信号出力端子，201～203は光多重回路，204は光分波回路をそれぞれあらわしている。



社団法人 電子情報通信学会  
THE INSTITUTE OF ELECTRONICS,  
INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERS

信学技報  
TECHNICAL REPORT OF IEICE.  
OCS97-50, ED97-140, OPE97-95  
LQE97-95(1997-11)

## マイケルソンGT干渉計(MGTI)を用いる多機能光フィルター

ディングエル ベンジャミン, 井筒 雅之

郵政省 通信総合研究所

〒184 東京小金井市貫井北町4-2-1

Tel: 0423-27-5647, E-mail: bdingel@crl.go.jp

あらまし

将来のインテリジェントかつ大容量/高密度光波長多重(WDM)通信およびネットワークシステムのためのマイケルソンGT干渉計(MGTI)を用いる多機能光フィルターを提案する。MGTIフィルターは典型的なマイケルソン干渉計で、一つの反射鏡をGTRで代替する。このデバイスのユニークな特徴は、干渉計の間隔差によりchannel droppingやchannel passingやwide bandpass filterとして機能するという点である。これらの機能の出力は一つのポートで行われる。そのほかのユニークな光特性として、(1)channel droppingやchannel passingとともに、典型的なファブリペロフィルターとパラメータが同様でありながらそのスペクトル線幅が2分の1である、(2)上記3つの機能の出力のvisibilityは反射率の値の違いに関わらず常に同じである、(3)バンドパスフィルター(BPF)としてはほぼ完全に近い周波数応答関数が得られる、等が挙げられる。これら特性を示す計算値やその他の応用に紹介する。

キーワード

### Multi-Function Optical Filter using Michelson-GT Interferometer

Benjamin B. Dingel and Masayuki Izutsu

Communication Research Laboratory (CRL),

Ministry of Posts and Telecommunications

4-2-1 Nukui-Kitamachi, Koganei-shi, Tokyo, 184 Japan

Abstract

We propose a novel multi-function optical filter for future smart, high density wavelength division multiplexed (WDM) communication and network system applications using a Michelson-GT interferometer (MGTI). MGTI filter is a typical Michelson interferometer in which one of its reflecting mirror is replaced by Gires-Tournois resonator (GTR). One unique feature of this device is that it can function as channel dropping, channel passing and wide bandpass filters depending on the interferometer arm length difference. The output of these functions is available in a single port. Other interesting features of this element are (1) linewidths of both channel dropping and channel passing filters are twice as narrow compared with typical Fabry-Perot filter having similar parameters, (2) visibility of the output for three functions is always unity regardless of the mirror reflectance value, and (3) bandpass filter has an excellent, near-perfect, box-like response function. Numerical results showing these characteristics are presented and other applications are briefly discussed.

key words



## I. Introduction:

Optical filter is one key device for future high density wavelength-division multiplexed (WDM) optical communication and network systems. In order to maximize the present 30-nm communication window supported by erbium fiber amplifier for WDM network systems, there is an increasing demand for new tunable channel passing (CP) filters and channel dropping (CD) filter [1] that have wide free spectral range ( $\text{FSR} > 30 \text{ nm}$ ), narrow linewidth ( $\Delta\lambda_{\text{FWHM}} < 0.5 \text{ nm}$ ), and high signal-to-noise ratio (SNR) characteristics. Besides these filters, there is also an important need for bandpass (BP) filter with excellent, near-perfect box-like response function.

CP filters access one channel of WDM signal and leave other channels undisturbed while CD filters perform the reverse functions. Resonant-type filters such as fiber ring resonator [1-4], fiber Fox-Smith resonator [5-7] and conventional fiber Fabry-Perot resonator (FP) [8-10] are attractive candidates for CP and CD filters because they have the potential to provide the narrowest linewidth.

Fiber ring resonator [1] can be made compact, easily tunable and fiber-compatible. However, the FSR of this device is limited to 21.6 GHz [4] or less due to bending loss coming from its short radius ( $r = 15 \text{ mm}$ ). Cracks due to bending, and side-band signals due to contra-directional beam are other disadvantages associated with this device. On the other hand, fiber Fox-Smith resonator in the form of coupled fiber Fabry-Perot resonator (CF-FFR, type I and type II) do not suffer from bending radiation loss because the resonator arms can be laid straight [5]. However, the effective resonator length is longer compared with ring resonator or conventional FP resonator having similar arm length because of two reasons namely; (1) the light beam travels both arms of the resonator and (2) the beamsplitter or coupler is positioned inside the resonator. These factors

decrease the FSR of the device. Although cascading two or more fiber ring resonators with different radius [1-3] or fiber Fox-Smith resonators with different resonator lengths [6-7] can increase FSR, this process brings unwanted side-band signals and introduces system complication that could negatively affect the device's long-term performance.

Compared with fiber Fox-Smith and ring resonators, conventional fiber FP resonator are more impressive device because they are very simple, has no radiation loss due to bending and cracks, and no polarization-dependent losses. Since, the resonator length can be made as short as possible, cascading is not necessary. FP filter with FSR equal or greater than 100 GHz have been demonstrated [9] and applied to WDM systems [10]. This device can be made tunable by either angular scanning [11] or horizontal (sliding) scanning [12]. FP filter has the best potential to obtain the narrowest linewidth and widest FSR in a simple and stable configuration. Unfortunately, just like ring resonator and Fox-Smith resonator, FP filter device is a dedicated single-function element. For future smart WDM system, key optical devices such as optical filters need to be arbitrary programmable, at best, or need to possess multi-function capabilities, at the least, in order to make a very compact, versatile and intelligent system.

The main objective of this letter is to propose a novel multi-function optical filter for future, smart high-density WDM network systems. The proposed optical filter can function as CP filter, CD filter and bandpass (BP) filter depending on a single tunable parameter. Other interesting features of this element are (1) narrow linewidths of both CP and CD filters compared with typical FP filter having similar parameters, (2) unity contrast for all three functions and (3) excellent, near-perfect box-like response function for BP filter.

## 2. Multi-Function Optical Filter:

The proposed device consists of a typical Michelson interferometer in which one of its reflecting mirror is a Gires-Tournois resonator (GTR) as shown Fig. 1. We will refer to this element as

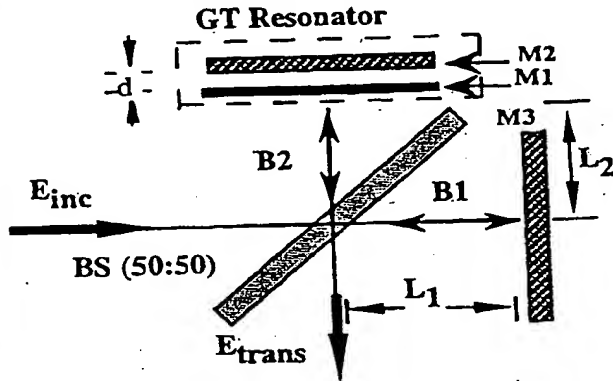


Fig. 1. Schematic of the proposed new multi-function optical filter using a Michelson interferometer in which one of the reflecting mirror is replaced by GT resonator.

Michelson-GT Interferometer (MGTI) filter. GTR [13-14] is basically a lossless asymmetric FP resonator with partially reflecting mirror M1 and 100% reflecting back mirror M2. The complex reflection coefficient and the reflected phase shift  $\Theta$  of GTR [14] can be derived as

$$\beta e^{i\theta} = \frac{E_{ref}}{E_{inc}} = \frac{\sqrt{R} + e^{-i2\theta}}{1 + \sqrt{R} e^{-i2\theta}} \quad (1)$$

$$\Theta(R, d) = -2 \tan^{-1} \left( \frac{1 - \sqrt{R}}{1 + \sqrt{R}} \tan(kd) \right) \quad (2)$$

where  $\beta$  ( $=1$ ) amplitude reflection coefficient,  $R$  ( $=p^2$ ) power reflectance of M1,  $\theta = 2\pi\eta d/\lambda = k\eta d$ ,  $d$  resonator length,  $\lambda$  wavelength, and  $\eta$  refractive index ( $=1$  for simplicity) of the material inside the resonator. The regenerative interference between the reflected waves coming from mirrors M1 and M2 is the physical mechanism behind the periodic phase-versus-frequency characteristic of GTR.

Light incident onto the MGTI filter is split into two beams B1 and B2 by beamsplitter BS, then propagate separately through arms ( $L_1$  and  $L_2$ ) of the

interferometer before they are coherently added at BS after their respective reflections from M3 and GTR. The coherent addition of beams B1 and B2 leads to transmitted output complex electric field  $E_{trans}$  and intensity  $I_{trans}$  given by

$$\frac{E_{trans}}{E_{inc}} = -i \sin \left[ \frac{2k\Delta L - \Theta(R, d)}{2} \right] \exp \left[ -i \frac{2k(L_1 + L_2) + \Theta(R, d)}{2} \right] \quad (3)$$

$$\frac{I_{trans}}{I_{inc}} = \sin^2 \left[ \frac{2k d \gamma - \Theta(R, d)}{2} \right] \quad (4)$$

where  $\Theta(R, d)$  is the reflected phase from GTR,  $\gamma = \Delta L/d$  is the ratio between interferometer arm length difference  $\Delta L (= L_1 - L_2)$  and GTR spacing  $d$ ,  $E_{inc}$  and  $I_{inc}$  are the complex incident electric field and intensity, respectively. In our derivation we assumed the whole system to be lossless and the R:T ratio of BS is 50:50. As mentioned before, this new element has an inherent capability to function either as CP, CD and BP filters depending on the value of  $\gamma$  or  $\Delta L$  as summarized in Table I.

Optical Function	Key Parameter $\gamma = \Delta L/d$	Unique Characteristics
Channel Passing Filter	0	Linewidth: $\Delta\nu_{MGTI}$ is 1/2 of FP Contrast = 1
Channel Dropping Filter	$\frac{(2n+1)\lambda_0}{4d}$	Linewidth: $\Delta\nu_{MGTI}$ is 1/2 of FP Contrast = 1
Bandpass Filter	0.5	Linewidth: $\Delta\nu_{MGTI} = \text{FSR}$ Square-like freq. response Contrast = 1

Table I. Summary of the different optical functions that MGTI filter can realized by simply changing  $\gamma$ .

## 3. Numerical Results:

First, MGTI filter will function as channel passing filter when  $\gamma$  is 0 or  $\Delta L = 0$ . The calculated

transmitted intensity as a function of normalized frequency ( $\nu = d/\lambda$ ) for different values of complex amplitude reflectance  $\rho$  is shown in Fig. 2. The frequency response of the filter is periodic with the normalized frequency ( $\nu = d/\lambda$ ). The 30.8-nm-FSR is obtained if we assumed the center wavelength  $\lambda_c$  of the light source, GT resonator length  $d$ , and refractive index  $n$  are given by  $1.540 \mu\text{m}$ ,  $25\lambda_c$  and 1 (for

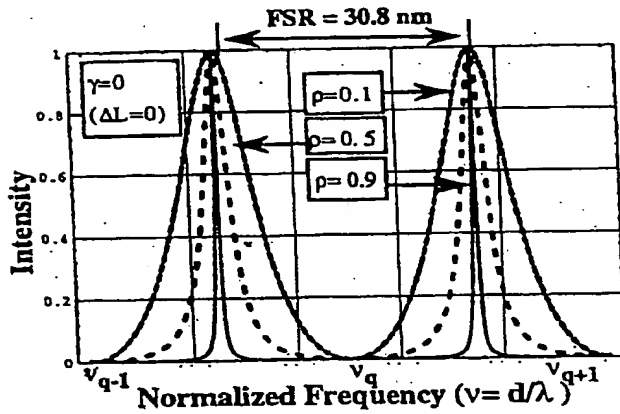


Fig. 2. Calculated result showing the transmitted intensity of MGTI filter when it functions as CP filter for three values of  $\rho = 0.1, 0.5$  and  $0.9$ . The contrast is always one regardless of the value of  $\rho$ . (FSR = 30.8 nm,  $d = 25\lambda_0$ ,  $\lambda_0 = 1.540 \mu\text{m}$ ).

simplicity), respectively. There are two superior features of this filter compared with conventional FP resonator having similar parameters. The first important feature of MGTI-based CD filter is its narrow linewidth as shown in Fig. 3a. The transmitted intensity of FP resonator for the same reflectance values are shown for comparison. The numerical ratio  $S$  of the linewidth (at FWHM) between the MGTI filter and FP filter for same spacing  $d$  can be derived as

$$S = \frac{\Delta\nu_{\text{MGTI}}}{\Delta\nu_{\text{FPR}}} = 2 \left[ \frac{\rho}{1-\rho^2} \right] \tan^{-1} \left[ \frac{1-\rho}{1+\rho} \right] \quad (5)$$

and shown in Fig. 3b. Here, we used a simplified expression for FP's linewidth  $\Delta\nu_{\text{FPR}}$  which is valid only for the case when  $(1-\rho^2) \ll 1$ . In the limit the value of  $\rho$  approaches unity, the linewidth of the

transmitted intensity of MGTI can be seen to be, at least, twice as narrow compared with FP's linewidth. For the case when  $\rho^2 \ll 1$ , the value of the ratio  $S$  becomes much smaller. This narrower linewidth provides significant advantage since it automatically doubles the Finesse ( $F$ ) of MGTI filter without any cascading effort. The second interesting feature of this CD filter is its contrast or visibility  $C$  defined here

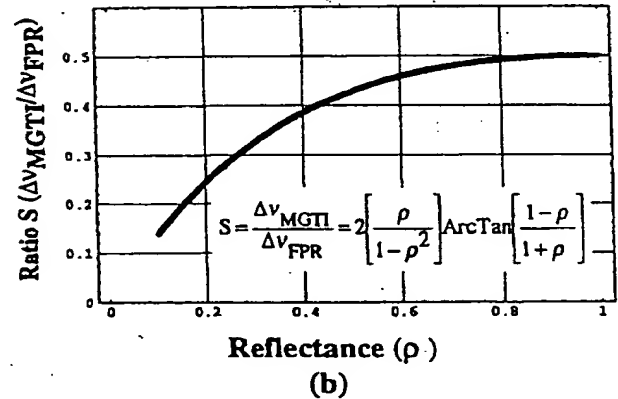
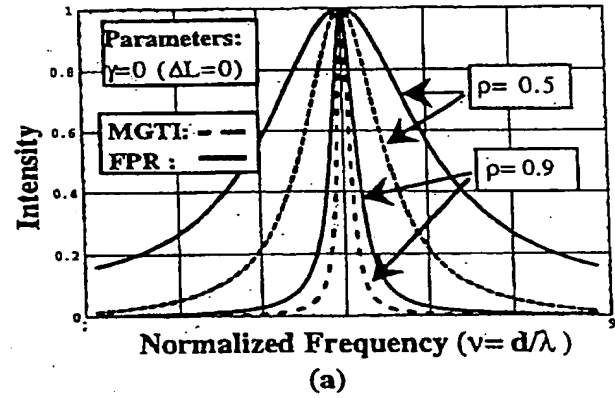


Fig. 3. Transmitted intensity of MGTI filter compared with FP filter having the same parameter value (a). The numerical ratio between the linewidth of MGTI and FP filters, as function of  $\rho$  for same resonator spacing  $d$  is depicted in (b). The MGTI linewidth is, at least, twice as narrow compared with FP for  $\rho > 0.8$ .

as  $C = [(I_{\text{max}} - I_{\text{min}})/(I_{\text{max}} + I_{\text{min}})]$ , where  $I_{\text{max}}$  and  $I_{\text{min}}$  are maximum and minimum transmitted intensities, respectively. The contrast of MGTI Filter is always unity regardless of the value of reflectance  $\rho$  provided that beamsplitter BS has equal splitting ratio (50:50 T:R). The above feature is absent in typical FP filter since its contrast is reflectance-dependent as

seen in Fig. 3a. Thus we expect the signal-to-noise (SNR) of the transmitted intensity coming from MGTI filter to be far better than FP filter especially when  $\rho$  is within the range of (0.1~ 0.8).

Secondly, MGTI filter will function as CD filter for certain normalized frequency range  $\Delta\nu = (\nu_1 < d/\lambda_0 < \nu_2)$  when  $\gamma = (2n+1)\lambda_0/4d$  [or  $\Delta L = (2n+1)\lambda_0/4$ ] with  $n$  being integer and  $\lambda_0/d$  is fixed center normalized frequency. Within this normalized frequency range

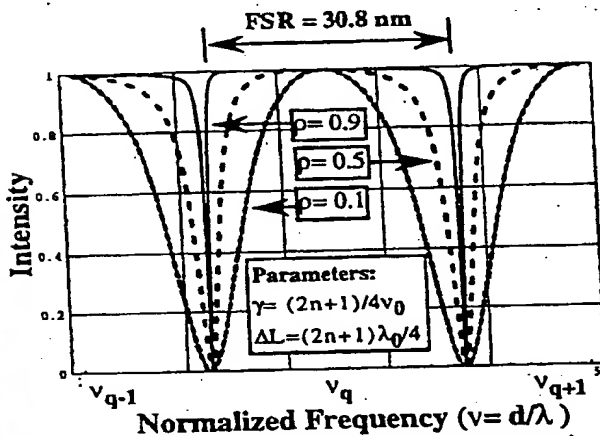


Fig. 4. Calculated result showing the transmitted intensity of MGTI filter when it functions as CP filter for three values of  $\rho=0.1, 0.5$  and  $0.9$ . The linewidth and contrast of MGTI-based CP filter are the same with MGTI-based CD filter except that transmitted output shape is reversed. (FSR= 30.8 nm,  $d=25 \lambda_0$ ,  $\lambda_0=1.540 \mu\text{m}$ ,  $n$ = integer).

$\Delta\nu$ , the term  $k d \gamma$  in (4) will nearly equal  $\pi/2$  so that output intensity is transformed from Sine into Cosine function. Just like the case of CP filter, a 30.8-nm-FSR filter can be obtained if we set  $\gamma = 0.01$  with the parameters  $d = 25\lambda_0$  and  $\lambda_0 = \lambda_c = 1.540 \mu\text{m}$ . The calculated transmitted intensity as a function of normalized frequency with  $\gamma = 0.01$  for different values of reflectance  $\rho$  is shown in Fig. 4. Compared with Fig. 2, the intensity output is just the inverse of output of CP filter although there is a small asymmetry in the frequency response as the frequency departs from  $d/\lambda_0$ . The linewidth and contrast are the same as in the case of MGTI-based CD filter and superior compared with FP filter.

Although the normalized frequency of CD is not periodic for all normalized frequency, the effective normalized frequency range  $\Delta\nu$  of CD filter is 4 times the FSR or nearly 120 nm for the case shown in Fig. 4. A wavelength deviation of about 50 nm from  $\lambda_0$  will introduces an insignificant 3.2% phase change from  $\pi/2$  term and will not pose a problem for channel dropping filter application.

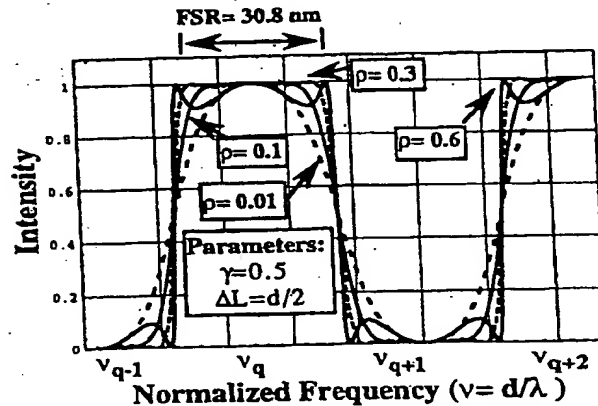


Fig. 5. Calculated result showing the transmitted intensity of MGTI filter when it functions as BP filter for four values of  $\rho=0.01, 0.1, 0.3$  and  $\rho=0.6$ . The output has nearly perfect box-like response with linewidth equal to FSR when the  $\rho=0.3$ .

Lastly, MGTI filter will function as bandpass (BP) filter when  $\gamma = 0.5$  or  $\Delta L = 0.5 d$ . The calculated transmitted intensity as a function of the normalized frequency for different values of reflectance  $\rho$  is shown in Fig. 5. The intensity output has a nearly perfect, box-like response with linewidth equal to FSR when  $\rho$  is within 0.1-0.3. Compared with other methods of generating box-like frequency response, the proposed filter is very simple with superior characteristics. Increasing the value of  $\rho$  from 0.3 to higher value enlarges the edge component (sideband) frequencies while decreasing the value of  $\rho$  from 0.1 changes the shape of the transmitted intensity output from square to sine-like shape.

#### 4. Conclusion:

As a summary, a new multi-function optical filter

is proposed for future smart, high-density WDM applications. The device can function as channel dropping (CD) filter, channel passing (CP) filter and bandpass (BP) filter depending on  $\Delta L$  of the interferometer. Linewidths of both MGTI-based CD and CP filters are twice as narrow compared with typical FP filter having similar parameters. BP filter has an excellent, near-perfect, box-like response function. Improvement of the linewidth by cascading and introduction of tunability by sliding method can be incorporated into the over-all device. This new device can also be used for optical Add/Drop multiplexer, wavelength-selective optical switch, etc. in WDM system. This multi-function device offers new design parameters for future intelligent WDM architecture which could considerably reduce the number of optical components needed in total system, reduce cost and size, and offer system flexibility. Fiber and waveguide implementations of the proposed filter are also possible. Variation using polarization elements and GT is also straightforward.

#### References:

1. B. E. Little, et. al, "Microring Resonator Channel Dropping Filters" J. Lightwave Technol., vol. LT-15, pp. 998-1005, 1997.
2. S. Suzuki, et. al, "Integrated-optic ring resonators with two stacked layers of silica waveguides on Si", IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 4, 1256-1258, 1992.
3. S. Suzuki, et. al, "Integrated-optic double-ring resonator with a wide free spectral range 100 GHz", J. Lightwave Technol., LT-13, pp. 1766-1771, 1995.
4. K. Oda, et. al, "A wide-FSR waveguide double-ring resonator for optical FDM transmission systems" J. Lightwave Technol., vol. LT-9, pp. 728-736, 1991.
5. P. Urquhart, "Transversely coupled fiber Fabry-Perot resonator: theory", Appl. Optics Vol. 26, 456-463, 1987.
6. M. Brierley et. al, "Transversely coupled fiber Fabry-Perot resonator: performance characteristics", Appl. Optics Vol. 26, 4841-4845, 1987.
7. P. Urquhart, "Compound optical-fiber-based resonator" J. Opt. Soc. Amer. A, vol. 5, pp. 803-812, 1988.
8. F. Sanchez, "Matrix Algebra for all fiber optical resonator" J. Lightwave Technol., vol. LT-9, 838-844, 1991.
9. S. Mallison, "Wavelength-selective filters for single-mode fiber WDM systems using FP interferometers" Appl. Optics Vol. 26, 430-436, 1987.
10. J. Stone et. al, "Pigtailed high-finesse tunable fiber Fabry-Perot interferometers with large, medium and small free spectral ranges" Elect. Lett. Vol. 23, 781-782, 1987.
11. K. Oda et. al, "An optical FDM-Add/Drop Multiplexing Ring Network utilizing Fiber-Perot Filters and Optical Circulators", IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 5, 825-828, 1993.
12. A. Frenkel, et. al, "Angle-tuned Etalon Filters for Optical Channel Selection in High Density Wavelength Division Multiplexed Systems", J. Lightwave Technol., LT-7, 615-624, 1989.
13. P. H. Lissberger, et. al, "Narrowband position-tuned multilayer interference filter for use in single-mode-fiber systems", Electr. Lett. Vol. 21, No. 18, 798-799, 1985.
14. F. Gires and P. Tournois, C.R. Acad. Sci. 258 (5), 612 (1964).
15. A. Yariv and P. Yeh, *Optical Waves in Crystal* (Wiley, New York, 1990) p. 219.